УДК 678.02:678.057

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОЧЕРВЯЧНОЙ МАШИНЫ С КОНИЧЕСКИМ КАНАЛОМ ЧЕРВЯКА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РЕЗИНОВОЙ СМЕСИ

А.А. Татарников, Д.Б. Горбунов

Томский политехнический университет
E-mail: atp@tpu.ru

Рассмотрены вопросы исследования динамических характеристик напорной зоны одночервячной машины. Разработана методика аналитического расчета временной характеристики напорной зоны одночервячной машины по каналу «питание напорной зоны – производительность машины». Проведена проверка применимости предложенной методики.

Согласно [1] переработка резиновых смесей, несмотря на принадлежность их к псевдопластичным средам, существенно отличается от переработки расплавов полимеров. Это отличие заключается в том, что часть канала червяка может быть не полностью заполнена перерабатываемым материалом, поэтому длину нарезной части червяка условно можно разделить на три зоны: питания, буферную и напорную [1]. Напорная зона представляет собой часть канала червяка, полностью заполненного по его сечению перерабатываемым материалом. Под зоной питания понимается часть нарезки червяка под загрузочной воронкой. Буферная зона является промежуточной зоной между зоной питания и напорной зоной. Буферная зона меняет свою длину в зависимости от длины напорной зоны. Наличие буферной зоны делает процесс в зоне питания независимым от процесса в напорной зоне.

В работе [2] проведено исследование работы буферной зоны и зоны питания, по результатам которых можно сказать, что одночервячная машина (ОМ) работает в квазистационарном режиме. Среди большого количества факторов, оказывающих влияние на производительность напорной зоны ОМ (при относительной стабильности частоты вращения червяка, вязкости экструдируемого материала, изменения геометрических размеров ленты питания), в большей степени будут оказывать влияние колебания массы отдельных сегментов перерабатываемого материала, которые двигаются в буферной зоне.

Из теоретических [3, 4] и экспериментальных [5] работ, посвященных исследованию переходных режимов, вытекает вывод, что ОМ, как объект регулирования, можно описать апериодическим звеном определенного порядка. В этом случае параметры апериодического звена определяются параметрами режима работы ОМ. Если выделить изменение массы сегментов, двигающихся в буферной зоне, как основное возмущающее воздействие, то для исследования колебаний производительности ОМ необходимо знать передаточную функцию ОМ по каналу «питание напорной зоны – производительность машины». Зная передаточную функцию для определенного режима работы ОМ, можно прогнозировать колебания размеров экструдируемого материала.

Передаточную функцию ОМ можно получить экспериментальным и аналитическим способами. Ниже рассматривается один из возможных аналитических методов определения передаточной функции ОМ по каналу «питание напорной зоны – производительность машины».

Определение переходной характеристики производится по уравнению:

$$\frac{L_{нз}}{D}=\frac{\mu_{0f}\left(\dfrac{q_м}{k'_г}k\pi DN\cos(\varphi)hwF_D\varepsilon_k\right)^{\frac{1}{n_f}}h^{\frac{1}{n}+1}}{\mu_0[\pi DN\cos(\varphi)(n+1)]^{\frac{1}{n}}D\,2^{\frac{1}{n_f}}B_{гр}}, \qquad (1)$$

где D – диаметр червяка; h – глубина нарезки канала червяка; φ – угол нарезки канала червяка; w – ширина винтового канала в направлении, перпендикулярном стенкам канала; k – число заходов червяка; $L_{нз}$ – длина напорной зоны; $B_{гр}$ – безразмерный градиент давления, определяемый по значению производительности на входе в напорную зону – $q_р$; n – индекс течения материала в канале червяка; μ_0 – коэффициент консистенции материала в канале червяка;

$$q_м=\frac{Q_м}{Q_{\max}}=\frac{Q_м}{0{,}5k\pi DN\cos\varphi hwF_D\varepsilon_k}$$

– безразмерная производительность червячной машины; $Q_м$ – объемная производительность ОМ;

$$\varepsilon_k=1-\frac{\pi(r_1^2+r_2^2)}{4hw}$$

– коэффициент, учитывающий уменьшение сечение канала за счет скругления у основания гребней; r_1 – первый радиус скругления у основания канала червяка; r_2 – второй радиус скругления у основания канала червяка F_D – коэффициент формы вынужденного потока; μ_{0f} – коэффициент консистенции материала в головке; n_f – индекс течения материала в головке; $k'_г$ – коэффициент сопротивления формующей головки для течения псевдопластичной жидкости; N – частота вращения червяка.

На базе ур. (1) основана методика построения кривой переходного процесса производительности ОМ по каналу «питание напорной зоны – производительность машины» с нанесением отрицательного возмущающего воздействия питанием напорной

зоны. Суть методики заключается в последовательном вычислении точек переходного процесса, которые определяются при постепенном уменьшении производительности ОМ на величину $\Delta q_м$. Величина $\Delta q_м$ выбирается из условия, что на интервале между двумя соседними точками переходного процесса производительность можно считать изменяющейся линейно. В этом случае скорость уменьшения длины напорной зоны на i-ом интервале между двумя соседними точками переходного процесса можно определить по формуле

$$v_i = 0.5\pi DN\cos(\varphi)\overline{q}_м^i F_D \varepsilon_k, \qquad (2)$$

где $\overline{q}_м^i$=0,5($q_м^i$+$q_м^{i+1}$) – средняя безразмерная производительность ОМ между двумя соседними точками переходного процесса.

При этом время изменения производительности на величину $\Delta q_м$ определяется по формуле

$$\Delta t_i = (L_{нз}^i - L_{нз}^{i+1})/v_i, \qquad (3)$$

где $L_{нз}^i$ – длина напорной зоны, определяемая производительностью $q_м^i$; $L_{нз}^{i+1}$ – длина напорной зоны, определяемая производительностью $q_м^{i+1}$.

Приращение $\Delta q_м$ можно сохранять постоянным на протяжении всего расчета переходной характеристики, а также можно его величиной варьировать.

Пошаговая методика аналитического расчета динамических характеристик ОМ состоит в следующем:

1. Задаются исходные данные:
   1.1. Для червячной машины геометрические характеристики: h, м; D, м; w, м; φ, град; зазор между внутренним диаметром корпуса и внешним диаметром червяка – δ, м; ширина гребня червяка вдоль его оси – e, м; r_1, м; r_2, м; k.
   1.2. $Q_м$, м^3/с; $k'_г$, м^3; N, с$^{-1}$; плотность перерабатываемого материала – ρ, кг/м^3; аналитический или графический вид истинной кривой течения перерабатываемого материала $\tau=f(\dot{\gamma})$.
2. По исходным данным определяются недостающие данные:
   2.1. Давление материала в формующей головке – $P_г$, МПа; значения коэффициентов F_D и ε_k; Q_{max}, м^3/с; $q_м$.
   2.2. Значения n и μ_0 [МПа·с$^{1/n}$] материала в канале червяка.
3. Для стационарного режима, при котором производительность ОМ постоянна, рассчитывается «нулевая» точка переходной функции. За «нулевую» точку принята точка начала отсчета времени, в которой прекращается питание напорной зоны. В «нулевой» точке фиксируются $q_м^0$, μ_{of}^0, n_f^0 и начальное время процесса t_0=0, с. Рассчитывается безразмерный расход утечки $q_{ут}^0$ [6] и безразмерная производительность напорной зоны q_p^0 [6]. Далее по q_p^0 определяется $B_{гр}^0$ [6] и по формуле значение $L_{нз}^0$, м.
4. Определение первой точки переходного процесса. Задается приращение производительности червячной машины $\Delta q_м$ и определяются величины $q_м^1$=$q_м^0$–$\Delta q_м$, μ_{of}^1, n_f^1, $q_{ут}^1$, q_p^1, $B_{гр}^1$, $L_{нз}^1$. Скорость изменения длины напорной зоны определяется по формуле (2), а время t_1 – по формуле (3).
5. Вторая и последующие точки переходного процесса определяются аналогично первой (см. пункт 4). Расчет точек переходного процесса необходимо продолжить до тех пор, пока $q_м^i$ не станет равным нулю.

Для оценки применимости предложенной методики расчета и построения переходного процесса необходимо сравнить экспериментально полученный переходный процесс производительности ОМ с переходным процессом, который рассчитан аналитически по методике.

В работе [7] представлены результаты сравнения экспериментальной и полученной аналитически по вышеизложенной методике временных характеристик. Экспериментальная переходная характеристика ОМ получена на экспериментальной установке (ЭУ) [8] при экструзии модельного тела (тесто, выполненное из муки высшего сорта и водопроводной воды в соотношении по массе 2:1). В ЭУ использовался однозаходных червяк с постоянной глубиной и постоянным шагом нарезки канала. Результаты обработки [7] экспериментальной временной характеристики и рассчитанной аналитически показали, что ОМ как объект управления можно описать звеном, которое эквивалентно последовательному соединению апериодического звена первого порядка и звена чистого запаздывания. Передаточная функция ОМ по каналу «питание напорной зоны – производительность машины», рассчитанная аналитически по методике, имеет вид

$$W(p)_a = \frac{1}{38p+1}\exp(-0,3p),$$

а полученная экспериментально –

$$W(p)_э = \frac{1}{36p+1}\exp(-2,1p).$$

С целью проверки применимости аналитической методики расчета временной характеристики ОМ, имеющей червяк с коническим каналом, проведены экспериментальные исследования на лабораторном оборудовании управления научно-технического развития ООО «Томскнефтехим». Исследования проводились при переработке смеси, имеющей следующую рецептуру: на 100 массовых частей каучука марки СКЭПТ-50 добавлено 11 массовых частей атактического полипропилена.

Реологические характеристики приготовленной смеси были исследованы на капиллярном вискозиметре постоянного расхода марки «Instron 3211» [9] при температурах 80, 100, 120 и 140 °С. Обработка экспериментальных данных и получение уравнения истинных кривых течения (зависимость между ис-

тинной скоростью сдвига и напряжением сдвига) проведены по методике, изложенной в [10]. Уравнение истинной кривой течения имеет вид [10]

$$\tau = \frac{\eta_н \dot{\gamma}}{1 + C_2 \dot{\gamma}^{2\alpha}}, \qquad (4)$$

где τ – напряжение сдвига, МПа, $\dot{\gamma}$ – истинная скорость сдвига, с$^{-1}$, α и C_2 – постоянные коэффициенты; $\eta_н$ – коэффициент ньютоновской вязкости, МПа·с.

Значения α, C_2 и $\eta_н$ для кривых течения вида (4), полученных при различных температурах (T) смеси, представлены в табл. 1.

Таблица 1. *Значения α, C_2 и $\eta_н$ для кривых течения вида*

T, °С	α	C_2	$\eta_н$
80	0,4039	0,3117	0,048
100	0,4134	0,1496	0,0202
120	0,4077	0,1023	0,0105
140	0,3822	0,1769	0,0109

На рис. 1 представлены графики истинных кривых течения, которые построены по данным табл. 1 и по ур. (4), а также экспериментальные точки напряжения сдвига и истинной скорости сдвига.

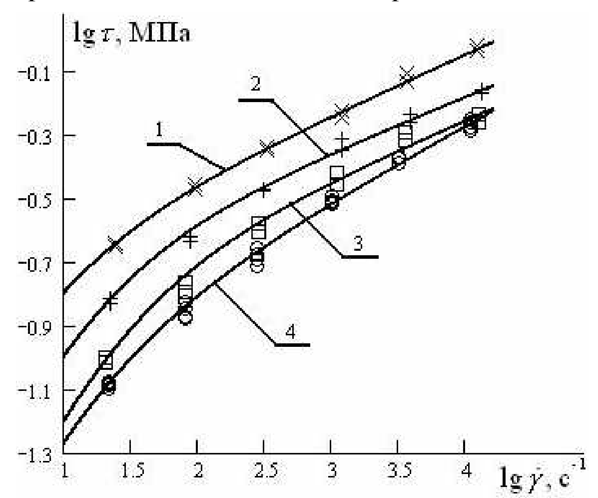


Рис. 1. *Истинная кривая течения при: 1) 80, 2) 100, 3) 120, 4) 140 °С. Экспериментальные точки: × – 80, + – 100, □ – 120, ○ – 140 °С*

Временные характеристики получены на лабораторном экструдере PL V151 фирмы «BRABENDER» при питании экструдера лентой шириной a=0,015 м, толщиной b=0,0005 м. При этом применялся конический червяк с постоянным шагом нарезки. Геометрические характеристики червяка следующие: D=0,019 м, k=1, w=0,015 м, φ=17,65°, δ=0,00005 м, e=0,0036 м, r_1=0,0025 м, r_2=0,0035 м, глубина канала в зоне питания h_p=0,00375 м, глубина канала на выходе червяка h_n=0,0018 м. В экструдере PL V151 возможно установка частоты вращения червяка в пределах N=0...150 об/мин. В данной модификации экструдера существует три зоны (длина первой зоны составляет 0,135 м и отстает от загрузочной воронки на расстоянии 0,04 м, вторая зона отстает от первой на 0,016 м и составляет в длину 0,135 м, третья зона находится на расстоянии 0,016 м от второй зоны и на расстоянии 0,032 м от головки, и составляет в длину 0,08 м) нагрева и двухпозиционного регулирования температуры (соответственно по зонам T_1, T_2, T_3) цилиндра по длине ОМ, который состоит из двух слоев. Между слоями цилиндра установлены нагревательные элементы, температура которых измеряется при помощи термоэлектрических преобразователей. Для предотвращения перегрева отдельных зон в пространство между слоями цилиндра принудительно подается воздух с компрессорной станции. В экструдере PL V151 также осуществляется двухпозиционное регулирование температуры в головке ($T_г$) ОМ.

Эксперимент получения переходной характеристики состоял в следующем. Устанавливалось фиксированное значение N и после стабилизации давления материала в формующей головке червяка (использовалась кабельная головка), что свидетельствует о стационарности процесса, измерялись $Q_м$, $P_г$ и ρ. Далее питание ОМ прекращалось и производилось измерение производительности машины в переходном режиме. Объемный расход машины измерялся дискретно через определенные интервалы времени. В табл. 2 представлены технологические параметры процесса экструзии смеси для двух различных режимов работы экструдера PL V151.

Таблица 2. *Технологические параметры процесса экструзии*

Технологический параметр	Режим работы ОМ № 1	Режим работы ОМ № 2
N, об/мин	30	45
$Q_м$·10^8, м^3/с	8.93	15.1
$P_г$, МПа	5.9	9.2
$k_г'$·10^{10}, м^{3*}	1.365	1.365
ρ, кг/м^3	860	860
T_1, °С	110	110
T_2, °С	115	115
T_3, °С	120	120
$T_г$, °С	115	115

**Значение коэффициента определено по [11. Ф. VIII.249] и представлено относительно коэффициента эффективной вязкости в канале червяка [11. Ф. VIII.253]*

На рис. 2 и 3 представлены результаты измерения объемной производительности ($Q_м^э$) ОМ в переходном режиме (соответственно для режимов работы ОМ № 1 и № 2), полученные в ходе эксперимента (на рис. 2 точки помечены знаком «×», а на рис. 3 знаком «+»). Экспериментальные данные (см. рис. 2 и 3) предварительно были сглажены по методу пяти точек.

Поскольку при получении экспериментальных данных переходной характеристики (рис. 2 и 3) входное возмущающее воздействие имело отрицательный знак (питание напорной зоны было прекращено), то при нанесении положительного возмущения (в предположении линейности системы) скорость изменения производительности по абсо-

лютному значению сохранится прежней, но будет иметь противоположный знак (по сравнению со скоростью изменения производительности при нанесении отрицательного возмущающего воздействия) и поэтому производительность с течением времени будет возрастать, при этом предельное изменение производительности сохранится. Таким образом, экспериментальные данные объемной производительности ($Q_м^{э,мод}$) при нанесении положительного возмущения будут иметь вид, представленный на рис. 4 для режима работы ОМ № 1 (помечены знаком «×») и на рис. 5 для режима работы ОМ № 2 (помечены знаком «+»).

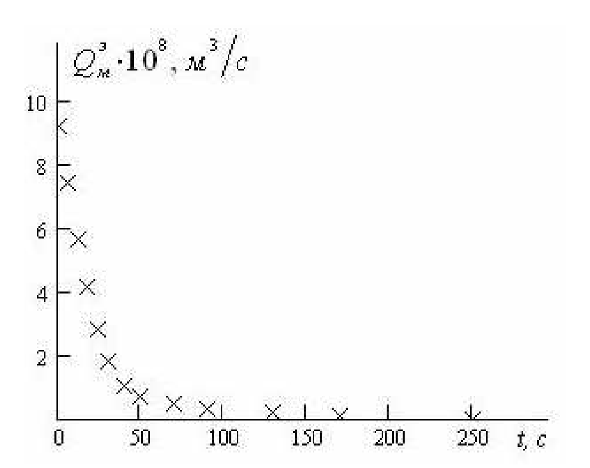


Рис. 2. Экспериментально полученная $Q_м$ в переходном режиме при прекращении питания напорной зоны для режима № 1

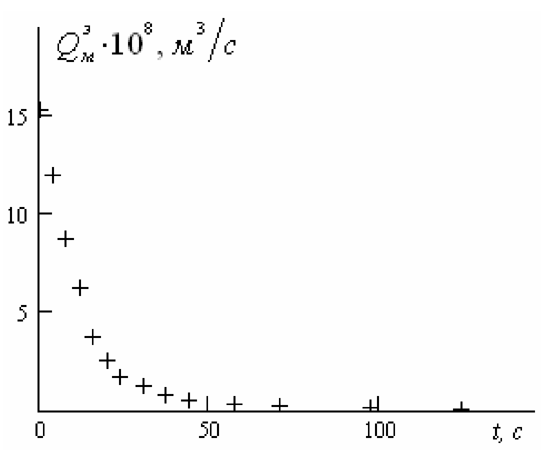


Рис. 3. Экспериментально полученная $Q_м$ в переходном режиме при прекращении питания напорной зоны для режима № 2

По методике, представленной выше, произведен аналитический расчет точек переходных процессов (для режимов № 1 и № 2). При этом значение глубины нарезки канала червяка определялось по формуле h=0,5($h_р$+$h_п$). Аналитически рассчитанные точки переходных процессов (для режимов № 1 и № 2) производительности ОМ по каналу «питание напорной зоны – производительность машины» при нанесении положительного возмущения питанием напорной зоны (в предположении линейности системы) были аппроксимированы. В результате обработки аналитических данных получены передаточные функции для режима № 1:

$$W(p)_a^1 = \frac{1}{21p+1}\exp(-0,2p)$$

и для режима № 2:

$$W(p)_a^2 = \frac{1}{12p+1}\exp(-0,5p).$$

По передаточным функциям $W(p)_a^1$ и $W(p)_a^2$ рассчитаны аппроксимирующие кривые, которые представлены на рис. 4 (для режима № 1 работы ОМ) и на рис. 5 (для режима № 2 работы ОМ).

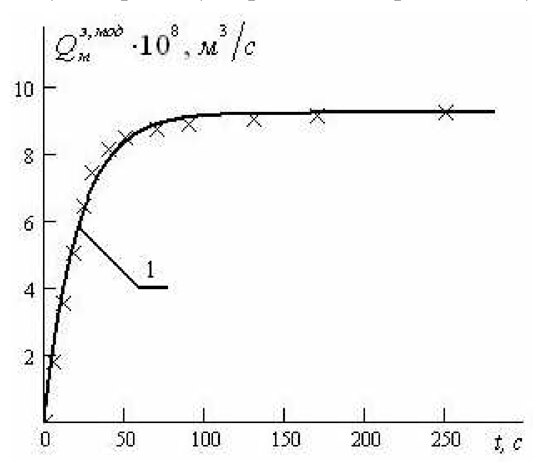


Рис. 4. Переходный процесс $Q_м$ при нанесении положительного возмущения питанием для режима № 1

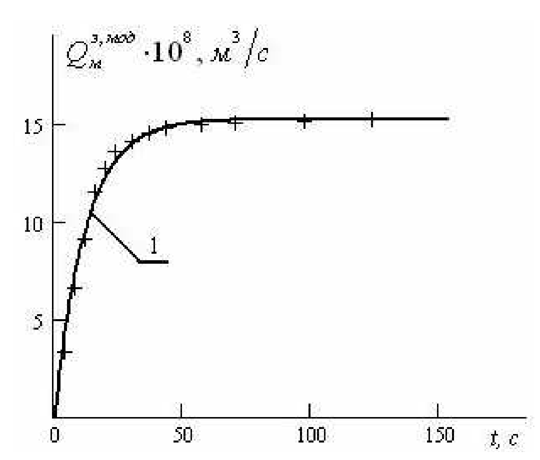


Рис. 5. Переходный процесс $Q_м$ при нанесении положительного возмущения питанием для режима № 2

Как видно из рис. 4 и 5, методика аналитического расчета точек переходного процесса оправдывает свое применение для червяков с коническим каналом.

В заключение следует отметить, что впервые разработана методика аналитического расчета точек переходного процесса производительности ОМ по каналу «питание напорной зоны – производительность машины». При помощи данной методи-

ки в среде «MATLAB.SIMULINK» исследовано влияние режима работы ОМ на колебания производительности ОМ. Показано, что при помощи режимных мероприятий (гидравлическое сопротивление в головке, производительность машины, температура экструзии, режим питания ОМ) можно управлять колебаниями производительности ОМ, сводя их к минимуму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Татарников А.А., Буртелов Л.В. Принципиальные отличия процесса переработки резиновой смеси от переработки расплава на одночервячных машинах // Каучук и резина. – 2002. – № 5. – С. 29–31.
2. Изучение статического режима работы буферной зоны одночервячной машины при переработке псевдопластических сред / Татарников А.А., Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В. – Томск. полит. ун-т. – Томск, 2005. – 22 с. – Деп. в ВИНИТИ 11.04.05, № 491–В2005.
3. Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В. Вычисление коэффициентов чувствительности одночервячной машины как объекта управления по различным каналам возмущающих воздействий // Современная техника и технологии: Труды VI Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2000. – С. 309–311.
4. Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В., Татарников А.А. Динамические характеристики одночервячной машины как объекта управления при переработке резиновых смесей // Современная техника и технологии: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2001. – Т. 2. – С. 47–49.
5. Ausias G., Beurrier J.-M., Burgof F., Piasco J.-M. Rubber extrusion process model // Kautsch. und Gummi. Kunstst. – 1997. – V. 50. – № 3. – P. 232–237.
6. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. Влияние расхода утечки на процесс переработки резиновой смеси в напорной зоне червячной машины // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 4. – С. 7–9.
7. Описание динамических характеристик одночервячной машины при переработке псевдопластичных сред / Татарников А.А., Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В. Томск. полит. ун-т. – Томск, 2005. – 22 с. – Деп. в ВИНИТИ 21.12.05, №1724–В2005.
8. Проверка адекватности математических моделей производительности напорной зоны одночервячной машины, перерабатывающей псевдопластичные среды / Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В., Татарников А.А. Томск. полит. ун-т. – Томск, 2004. – 14 с. – Деп. в ВИНИТИ 15.07.04, № 1237–В2004.
9. Малкин А.Я., Чалых А.Е. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. – М.: Химия, 1979. – 304 с.
10. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. Новый метод обработки экспериментальной кривой течения псевдопластичной среды // Известия вузов. Пищевая технология. – 2005. – № 5–6. – С. 105–108.
11. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). – М.: Химия, 1977. – 464 с.

УДК 625.032:534.1